

УДК 621.9.048.6

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.131047

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГЛАДЖУВАННЯ З УЛЬТРАЗВУКОМ

В. В. Турич

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: richv@i.ua

В. С. Руткевич

Кандидат технічних наук*

E-mail: v_rut@ukr.net

Н. М. Гончарук

Кандидат сільськогосподарських наук

Кафедра годівлі сільськогосподарських тварин та водних біоресурсів**

E-mail: Baluh-nata@ukr.net

Г. М. Огороднічук

Кандидат сільськогосподарських наук, доцент

Кафедра технології виробництва продуктів тваринництва**

E-mail: ohorodnichukhalina@gmail.com

*Кафедра машин та обладнання сільськогосподарського виробництва**

**Вінницький національний аграрний університет

вул. Сонячна, 3,

м. Вінниця, Україна, 21008

Досліджено та змодельовано процес поверхневого пластичного деформування з ультразвуком. Проведено аналіз контактної взаємодії інструмента з деталлю в процесі ультразвукового вигладжування з попереднім зазором. Аналіз дає можливість розраховувати зміну розмірів деталі в процесі обробки в залежності від режимів. Розроблені залежності площі контакту при ультразвуковому вигладжуванні з попереднім зазором від параметрів обробки. Проведено експериментальне дослідження впливу параметрів процесу ультразвукового вигладжування на параметри якості поверхневого шару деталі. Встановлено, що для забезпечення необхідної шорсткості і точності глибина впровадження не повинна перевищувати 7 мкм, особливо при обробці деталей які виготовлені із матеріалів з низьким модулем пружності.

Для проведення досліджень розроблено стенд на базі токарно-гвинторізного верстата особливо високої точності 16Б05АФ10. Всі додаткові пристрої та інструмент кріпляться в різцетримачі верстата.

Розроблено методику вимірювання часу контакту інструмента з виробом при ультразвуковому вигладжуванні з попереднім зазором.

Встановлено, що деформація мікронерівностей проходить за рахунок вдавлювання виступів мікронерівностей у западини, так як зсувну деформацію виключили за рахунок застосування твердого мастила. Про те, що зсувна деформація відсутня, говорить і той факт, що на мікрошліфах обробленої поверхні не вдалося виявити текстури, хоча зміцнення поверхні спостерігалось. Базуючись на цьому висновку, можливо не враховувати позаконтактну хвилю деформації.

Отримані аналітичні залежності площі контакту при ультразвуковому вигладжуванні з попереднім зазором від параметрів обробки, а саме: швидкості обробки, подачі, радіуса робочої поверхні інструменту. Результати математичного моделювання і експериментальні дані достатньо близькі. Визначена область оптимальних подач, що дає можливість отримувати поверхні з мінімальною шорсткістю або з мікрорельєфом

Ключові слова: поверхнєве пластичне деформування, ультразвукове вигладжування, деталь, глибина, подача, швидкість обробки

1. Вступ

Підвищення ефективності виробництва і створення конкурентоспроможної продукції в умовах ринкової економіки нерозривно пов'язані з розробкою принципово нових технологій, заснованих на нетрадиційних підходах до організації робочих процесів формування та зміцнення.

Існує великий ряд деталей, довговічність яких безпосередньо пов'язана з зносом робочих поверхонь. На підвищення зносостійкості впливають головним чином збільшення мікротвердості і зглажена округла форма мікронерівностей. Сприятливі умови для підвищення зносостійкості поверхні створюються при поверхневому пластичному деформуванні. Поверхнєве пластичне деформування забезпечує підвищення зносостійкості, опору втоми, контактної витривалості та інших експлуатаційних властивостей оброблюваних деталей на 20–50 % [1].

Разом з тим, для традиційних методів зміцнюючої технології, таких як накочення, розкочування і навіть вигладжування, характерні значні деформуючі зусилля, що обмежують застосування при обробці маложостких і тонкостінних деталей за виникаючих геометричних похибок. В той же час, введення в зону обробки ультразвукових коливань сприяє зниженню опору пластичного деформування і сил тертя на контактних поверхнях, що вкінцевому підсумку призводить до значного зниження статичних зусиль деформування.

Зазначені особливості процесу зумовили виникнення нового напрямку поверхневого пластичного деформування – зміцнюючої обробки інструментом, що коливається з ультразвуковою частотою (ультразвукова обробка) [2–4]. Ультразвукова обробка забезпечує отримання заданих властивостей поверхневого шару – частково або повністю регулярного мікрорельєфу, створення залишкових напружень стиску в поверхневому шарі оброблених поверхонь [2, 5, 6]. Ефективність ультразвукової обробки

визначається головним чином технологічним методом обробки і режимами [5]. Отже дане питання є цікавим і актуальним. Проведення досліджень у даному напрямку має велике прикладне значення у зв'язку із можливістю заощадження енергії і покращенням експлуатаційних і технічних властивостей деталей.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Задача підвищення експлуатаційної надійності машин набуває все більшого значення у зв'язку із збільшенням механічних, теплових та інших видів дії на деталі [6].

В умовах експлуатації поверхневий шар деталі піддається суттєвому фізико-механічному впливу: механічному, тепловому, магнітоелектричному, хімічному та ін.

В більшості випадків у деталей погіршуються експлуатаційні властивості поверхні, наприклад, знос, корозія, втомлювальні тріщини та інші елементи руйнування поверхні. Тому вимоги, що ставляться до поверхневого шару деталі, більш жорсткі [1].

Для деталей, руйнування яких починається з поверхні, розроблено велика кількість методів поверхневого зміцнення, заснованих або на нанесенні покриттів або на зміні стану (модифікації) поверхні.

При нанесенні покриття зміцнення деталі досягається шляхом осадження на поверхні матеріалів, які по своїм властивостям відрізняються від основного металу, але найбільш повно відповідають умовам експлуатації.

При модифікації поверхневого шару проходять фізико-хімічні зміни в металі, які підвищують його опір руйнуванню. Модифікація може здійснюватись деформаційним зміцненням (поверхневим пластичним деформуванням), поверхневою термообробкою, дифузійною металізацією. Не існує універсального метода зміцнення деталей, так як один і той же метод в одних випадках експлуатації може дати позитивний ефект, а в інших негативний.

Поверхнєве пластичне деформування (ППД) – це обробка деталей тиском (без зняття стружки), при якій пластично деформується тільки поверхневий шар. ППД здійснюється інструментом, деформуючі елементи (ДЕ) якого (кульки, ролики або тіла іншої конфігурації) взаємодіють з обробленою поверхнею. В результаті відбувається значне зниження шорсткості, зміцнення поверхневого шару [2–4].

Дослідження, в джерелах приведених вище, направляються головним чином на виявлення загальних і часткових закономірностей ППД при великій різноманітності засобів реалізації цього виду обробки.

ППД може бути здійснене одним із багатьох різноманітних способів, які умовно діляться на дві групи: статичні і динамічні або ударні. При статичних способах інструмент діє на оброблювану поверхню з певним постійним зусиллям. До них відносяться різноманітні способи вигладжування і накатування, а також дорнування.

При динамічних способах зусилля деформування змінюються від нуля чи якогось іншого певного значення до максимуму. При цьому контакт між деталлю і деформувальним елементом може бути постійним чи періодичним.

До динамічних відносяться різноманітні способи чеканки обробки дробом, вібраційної обробки тощо [7].

Кожен з методів ППД знаходить своє використання в умовах виробництва, але всі вони мають як переваги, так і ряд недоліків.

Статичні методи ППД отримали найбільш широке розповсюдження внаслідок відносної простоти реалізації і стабільності протікання процесу обробки [6].

Зміцнююче обкатування застосовують для обробки зовнішніх циліндричних поверхонь, торців і країв отворів, плоских і фасонних поверхонь.

За допомогою методу обкатування роликом підвищується втомна міцність і довговічність. Можливість отримання поверхні з низькою шорсткістю. Залишкові напруження поширюються на велику глибину. Межа витривалості в корозійному середовищі підвищується більш ніж в 4 рази.

При застосуванні методу обкатування кулькою здійснюється самовстановлення кулі під час обробки, що забезпечує отримання менш шорсткої поверхні при невеликому тиску кулі. Як переваги також можна виділити простоту конструкції і універсальність обкатника, втомна міцність може бути підвищена на 30–60 %, а глибина наклепу не перевищує 5 мм на м'яких матеріалах. Недоліками цього методу є те, що:

- абсолютна величина залишкових напружень невелика;
- обробка здійснюється при малих подачах (0,06–0,47 мм/об), що збільшить час обробки;
- якість обробки залежить від властивостей оброблюваного матеріалу, стану вихідної поверхні і режимів обкатування.

Вигладжування є одним з найбільш простих способів поверхневого пластичного деформування. Його відрізняє висока продуктивність і стійкість інструменту [7]. Вигладжуванням досягається шорсткість $R_a=0,32\text{--}0,10$ мкм, при обробці зростає мікротвердість і в поверхневому шарі створюються стискаючі залишкові напруження.

Перевагою алмазного вигладжування перед іншими методами обробки, такими як тонке точіння або шліфування, є те, що даний процес продуктивніший і досить простий. При вигладжуванні деталей поверхневий шар вільний від абразивних включень, що покращує експлуатаційні характеристики деталей. На експлуатаційні характеристики особливий вплив робить зміна фізико-механічних властивостей обробленої поверхні – збільшення твердості і зносостійкості. Найбільш ефективно застосовувати вигладжування для досягнення шорсткості поверхні не нижче 10 класу.

Але процес алмазного вигладжування не позбавлений недоліків. Це перш за все те, що поліпшення якості поверхні (шорсткості) не підвищує в такій самій мірі точність деталей, а лише в межах матеріалу, що деформується [8]. Наявність краєвих ефектів також знижує в значній мірі точність обробки. А обумовлено це явище наявністю сили притиску інструменту. Особливе це явище виявляється при обробці м'яких матеріалів: алюмінієвих сплавів, латуні і інших. Тому метод алмазного вигладжування не рекомендований для обробки алюмінієвих сплавів.

Крім того, наявність сили притиску є причиною зносу інструменту, що спричиняє за собою втрати в точності, а також викривлення геометричної форми нежорстких деталей, що робить даний спосіб неприйнятним для обробки даного класу деталей.

Ефективнішим методом поверхнево-пластичної деформації є процес зміцнюючої чистової обробки з ультра-

звуком [2, 9, 10]. Принцип обробки полягає в тому, що до деформуючого елементу (індентору) прикладені ультразвукові коливання. Інструмент здійснює коливання з певною амплітудою у напрямі впровадження в оброблювану поверхню. Інструментом служить кулька (як правило, із сталі ШХ15) або сферичний індентор.

В роботі [5] було запропоновано застосувати ППД з нанесенням регулярного мікрорельєфу. При дослідно-промисловій перевірці процесу проводились дослідження впливу параметрів і режимів обробки на герметичність спряження, припрацьованості і зносостійкості контактуючих поверхонь. Це дозволило підвищити експлуатаційні властивості тертьових пар «поршень – корпус».

В роботі [9] наводилися дослідження, які були спрямовані на припрацьованості зразків з технічного титану і зносу після обробки різними методами ППД. В результаті цих досліджень було виявлено, що на поверхнях, оброблених ППД, знос спрацювання менший в 2 рази. Таким чином, можна вважати, що підвищення зносостійкості титанових сплавів збільшується внаслідок оптимізації геометричних і фізичних параметрів оброблюваних методами ППД поверхонь.

Підвищити довговічність і витривалість виробів можливо створенням оптимальних полів залишкових напружень в тілі деталей [10]. Одним з таких методів є метод термопластичного зміцнення. Завдання створення полів остаточних напруг вирішується в два етапи: спочатку визначається температурне поле, а потім розраховуються залишкові напруги і пластичні деформації.

Працездатність деталей підвищують застосуванням комбінованої обробки різними методами ППД, а також обробки методами ППД в поєднанні з іншими методами зміцнення [11].

Наприклад, обробка поверхні методами ППД під хромування забезпечує найбільш високу якість і міцність хромового покриття. Циліндричні поверхні тертя деталей з титану можна зміцнювати комбінованим способом. Спочатку електроіскрове мікролегування, насичення та покриття поверхні надтвердими матеріалами, а потім жорстке обкатування. Обкатування забезпечує отримання необхідної точності і шорсткості поверхні, а також знижує шкідливий вплив мікролегування на опір втоми.

Взаємодія інструмента з поверхнею, що обробляється при вигладжуванні та вібровигладжуванні достатньо повно описана в роботах [1, 3, 6]. Взаємодія інструмента з деталлю в процесі ультразвукового алмазного вигладжування викладена в роботі [7, 12]. Показано, що застосування ультразвукових коливань при алмазному вигладжуванні зменшує статичну силу вигладжування, покращує якість поверхні.

Процес вигладжування, запропонований у [13], здійснюється при безперервній взаємодії інструмента з поверхнею, що обробляється. В той же час, встановлено [7], що в процесах пластичного деформування з накладанням ультразвукових коливань найбільш ефективним є імпульсний режим деформування. При даному режимі робоча поверхня інструмента періодично відокремлюється від поверхні деталі. В цьому випадку можливе зниження статичної сили деформування до 90 % [14]. Крім того, як показано в [15], такий режим сприяє збільшенню «фіктивної» жорсткості деталі. Однак, в більшості випадків, на практиці такий режим не реалізується, тому, що пружні деформації оброблюваної поверхні перевищують амплітуду коливань інструмента.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є обґрунтування технологічних параметрів вигладжування, які забезпечують оптимальну якість поверхні оброблюваних деталей. Це дасть можливість на основі дослідження механіки процесу виробити рекомендації по основних параметрах технологічного процесу.

Для реалізації даної мети необхідно розв'язати ряд задач:

- дослідити суть контактних явищ ультразвукового вигладжування з попереднім зазором шляхом аналітичного дослідження;
- встановити взаємозв'язок між окремими, діючими в процесі ультразвукового вигладжування факторами, у вигляді формул, які дозволяють виконати аналітичні розрахунки режимів обробки.

4. Матеріали та методи досліджень

Опис поверхневого пластичного деформування з ультразвуком побудували на основі використання реологічних моделей матеріалів, які відображають їх реальні пружно пластичні властивості. Такий підхід дозволяє виявити механізм впливу ультразвуку на процес пластичного деформування.

При дослідженні процесу поверхневого пластичного деформування з ультразвуком використовували наступні матеріали: сталі 10 (100 HB), 45 (150 HB, 50 HRC), ШХ15 (210 HB, 55 HRC), алюмінієві сплави Д16Т (120 HB), В95 (190 HB). Вигладжування проводилось інструментом із наконечником із твердого сплаву ВК15 із радіусом сфери 1, 2, 4 і 6 мм.

5. Контактна взаємодія інструмента з деталлю в процесі ультразвукового вигладжування з попереднім зазором

Для реалізації режиму імпульсного деформування, і як наслідок, отримання переваг такого режиму, запропоновано спосіб ультразвукового вигладжування [10, 11, 16, 17]. Суть його полягає в тому, що між деталлю 2 та інструментом 1 (рис. 1) встановлюється попередній зазор δ . Інструменту 1 у вигляді сферичного наконечника, закріпленого до концентратора магнітострикційного перетворювача, надають рух подачі і коливальний рух із частотою f і амплітудою ξ по нормалі до поверхні, що обробляється.

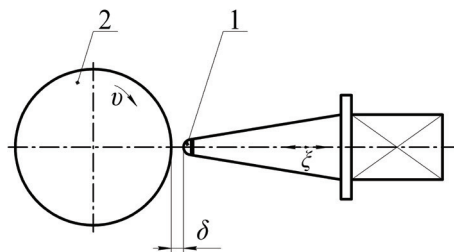


Рис. 1. Схема ультразвукового вигладжування з попереднім зазором:
1 – інструмент; 2 – деталь

Зазор δ повинен бути менше, ніж амплітуда коливань ξ . У процесі обробки інструмент періодично впроваджується в поверхню деталі на глибину:

$$h = \xi - \delta - h_{\text{пр}}, \quad (1)$$

де $h_{\text{пр}}$ – пружне відтиснення деталі.

Після здійснення впровадження інструмент відокремлюється від оброблюваної поверхні. На деталь діє тільки динамічне навантаження. Такий спосіб дозволяє обробляти нежорсткі та з переривчастими поверхнями деталі, не дає завалів та напливів на торцях. В літературних джерелах не виявлені подібні схеми поверхневого пластичного деформування. Тому для визначення умов, при яких проходить поверхневе пластичне деформування, необхідно провести теоретичні та експериментальні дослідження контактної взаємодії інструмента з деталлю в процесі ультразвукового вигладжування з попереднім зазором. Для проведення досліджень розроблено стенд (рис. 2) на базі токарно-гвинторізного верстата особливо високої точності 16Б05АФ10. Всі додаткові пристрої та інструмент кріпляться в різцетримачі верстата.

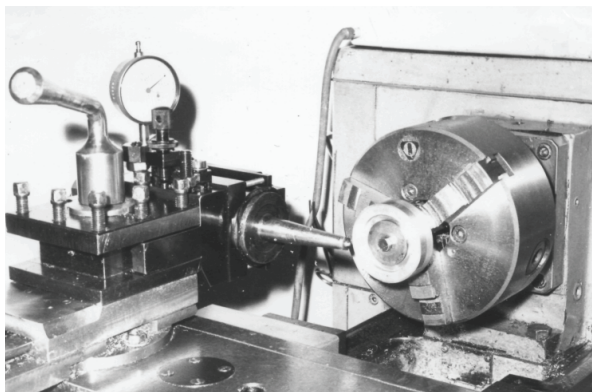


Рис. 2. Загальний вигляд стенда для вигладжування

Одним із найважливіших елементів технологічного процесу є призначення припусків на обробку. Особливо важливо це при обробці точних деталей. По даним [18], розмір деталей після алмазного вигладжування може змінюватись на 3–5 мкм. В [19] відзначається, що при ультразвуковому вигладжуванні практично не змінюється розмір деталі. Величина припуску для цієї операції визначається за формулою:

$$\Delta D = b \cdot R_{\text{авнх}}, \quad (2)$$

де ΔD – припуск на діаметр, мкм; b – коефіцієнт, який залежить від матеріалу деталі (для сталі 45 $b = 4,6$); $R_{\text{авнх}}$ – середнє арифметичне відхилення вихідного профілю поверхні, мкм.

В [15] показано, що пластична деформація при вигладжуванні визначається наступною залежністю:

$$U = 0,05 \cdot P - 0,5, \quad (3)$$

де P – сила вигладжування.

Як видно з наведених залежностей (2), (3), у них безпосередньо не враховуються механічні характеристики матеріалу деталі, радіус інструменту, глибина впровадження

інструмента в деталь. Тому для вивчення впливу режимів обробки на зміну розмірів деталей провели ряд дослідів. Досліди проводились на зразках із сталей 10 (100 HB), 45 (150 HB, 50 HRC), ШХ15 (210 HB, 55 HRC), алюмінієвих сплавів Д16Т (120 HB), В95 (190 HB). Вигладжування проводилось інструментом із наконечником із твердого сплаву ВК15 із радіусом сфери 1, 2, 4 і 6 мм. Розміри деталей вимірювались до та після обробки на вимірювальній машині фірми «Оліветі», а також важільною скобою з ціною поділки 1 мкм. На рис. 3 показані експериментальні залежності зміни діаметру деталі від глибини впровадження наконечника інструменту при обробці алюмінієвих сплавів.

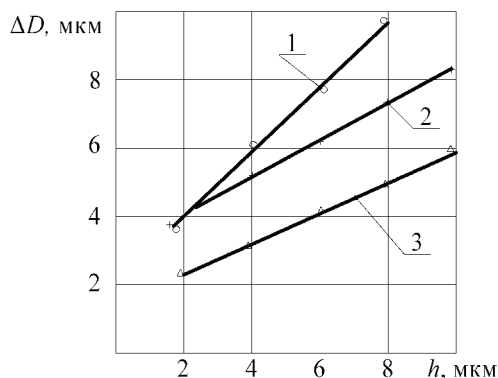


Рис. 3. Залежність зміни діаметра деталі від глибини впровадження: 1 – Д16Т; 2 – В95; 3 – ПВ90

Як видно з наведених залежностей, зміна діаметра залежить від твердості матеріалу деталі. Чим вище твердість, тим менше зміна. Вихідна шорсткість оброблюваної поверхні також суттєво впливає на зміну діаметра після обробки (рис. 4).

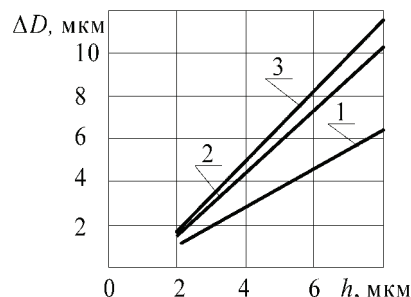


Рис. 4. Залежність зміни діаметра деталі від глибини впровадження індентора при різних вихідній шорсткості: оброблюваний матеріал – Д16; $\xi = 12$ мкм; $S = 0,01$ мм/об; $R = 2$ мм; 1 – $R_a 0,01$; 2 – $R_a 0,07$; 3 – $R_a 1,5$

При малих глибинах проникнення цей вплив зменшується, тому що зминаються лише вершини мікронеровностей. Із збільшенням глибини проникнення більш високі вершини зминаються інтенсивніше, так як у зоні контакту виникають значні контактні тиски, внаслідок малої фактичної площі контакту. Для всіх досліджених матеріалів ці залежності мають однаковий характер. Зміна діаметра деталі після обробки наконечниками з різними радіусами сфери показана на рис. 5.

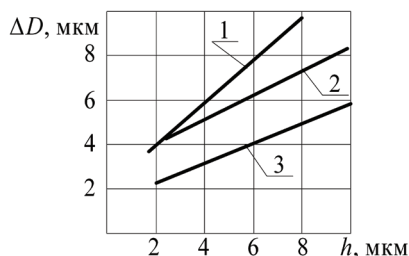


Рис. 5. Залежність зміни діаметра деталі від радіуса сфери наконечника: оброблюваний матеріал — Д16; $\xi = 12$ мкм; $S = 0,01$ мм/об; $V = 1,33$ м/с; 1 — $R = 2$ мм; 2 — $R = 4$ мм; 3 — $R = 6$ мм

При обробці інструментом із меншим радіусом сфери наконечника діаметр деталі зменшується більше ніж при обробці інструментом із більшим радіусом, при однаковій глибині впровадження. Це пояснюється тим, що контактні тиски пов'язані з площею контакту інструмента з деталлю. Очевидно, що для інструмента з меншим радіусом сфери наконечника площа контакту менша, а, відповідно, контактні тиски більше ніж для інструмента з більшим радіусом робочої сфери.

З ціллю виведення залежностей для визначення зміни діаметра деталі після обробки провели повний факторний експеримент [8]. В якості змінних факторів було прийнято:

- твердість матеріалу деталі HB 100–200;
- глибина впровадження $h = 2$ –8 мкм;
- радіус робочої сфери інструмента $R = 2$ –6 мм;
- вихідна шорсткість поверхні $R_a = 0,4$ –4 мкм.

Цільова функція має вигляд:

$$h_{пл} = C_0 \cdot HB^m \cdot h^n \cdot R^p \cdot R_a^t, \quad (4)$$

де C_0 — постійний коефіцієнт; m, n, p, t — невідомі показники степені.

Після перетворень отримаємо:

$$h_{пл} = 29,89 \cdot 10^6 \cdot HB^{-3,512} \cdot R^{-0,504} \cdot R_a^{0,189} \cdot h^{1,305 \ln HB - 5,43}. \quad (5)$$

Рівняння (5) дає можливість розрахувати величину пластичної деформації при ультразвуковому вигладжуванні з попереднім зазором, а отже і зміну розмірів деталей після обробки.

Аналогічно вивели рівняння для розрахунку зміни розмірів деталей після ультразвукового вигладжування загартованих сталей твердістю HRC 50...55. Воно має наступний вигляд:

$$h_{пл} = 0,0165 \cdot R^{-0,55} \cdot R_a^{0,15} \cdot h^{2,198}. \quad (6)$$

Границі змінних факторів у залежності (6) такі ж, як і в (5). Розрахунки коефіцієнтів регресії проводили на ПЕОМ за допомогою програми EXCEL 2016.

Рівняння (5), (6) дають можливість розрахувати припуск на обробку циліндричних деталей, в цьому випадку

$$\Delta D = 2h_{пл}. \quad (7)$$

Однак у процесі обробки можлива нерівномірна твердість металу заготовки, шорсткість поверхні, а також глибина впровадження інструмента в деталь за рахунок,

наприклад, конусності заготовки. Це призведе до зміни діаметра деталі повздовж твірної. При обробці точних деталей ця зміна може перебільшити межу допуску. Тому розміри таких деталей необхідно контролювати в процесі обробки. Розглянемо, як можливо здійснити такий контроль.

Переміщення інструменту запишемо у вигляді:

$$u(t) = \xi \cdot \sin \omega \cdot t, \quad (8)$$

де $\omega = 2\pi \cdot f$ — колова частота коливань, тут f — частота коливань.

Згідно рис. 1, до початку контактування з поверхнею деталі інструмент пройде шлях δ за час t_1 . Рівняння руху інструмента за цей проміжок часу запишемо як:

$$\xi \cdot \sin \omega \cdot t_1 = \delta. \quad (9)$$

Після досягнення інструментом поверхні деталі він згідно (1) впровадиться в деталь на глибину $h = \xi - h_{пр}$, а загальне, з початку періоду коливань, переміщення дорівнює амплітуді коливань ξ . Це переміщення проходить за проміжок часу t_2 . Рівняння руху в цьому проміжку часу виглядає наступним чином:

$$\xi \cdot \sin \omega \cdot t_2 = \xi. \quad (10)$$

В цей період здійснюється пружна й пластична деформація поверхні деталі. На наступному етапі напрямок вектора швидкості змінюється на протилежний і інструмент рухається від поверхні деталі. В цей час він знаходиться у контакті з деталлю на шляху, який дорівнює пружному відновленню самої деталі $h_{пр}$ та деформованої поверхні $h_{прп}$ на протязі часу t_3 . Якщо знехтувати величиною пружного відновлення деталі $h_{пр}$, то рівняння руху за цей період виглядає наступним чином:

$$\xi \cdot \sin \omega \cdot t_3 = h_{прп}. \quad (11)$$

Очевидно, що час контакту інструмента з деталлю рівний:

$$t_k = t_2 - t_1 + t_3. \quad (12)$$

З (9)–(11) визначимо:

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{\delta}{\xi}; \quad (13)$$

$$t_2 = \frac{\pi}{2\omega}; \quad (14)$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{h_{прп}}{\xi}. \quad (15)$$

Підставивши (13)–(15) в (12) і, зробивши нескладні перетворення, отримаємо:

$$t_k = \frac{1}{\omega} \left(\arccos \frac{\delta}{\xi} + \arcsin \frac{h_{прп}}{\xi} \right). \quad (16)$$

При вигладжуванні деталей з попередньою шорсткістю поверхні $R_a \geq 1,25 \dots 0,63$ мкм для першого навантаження, звичайно, переважає пластична деформація

виступів [7, 15, 18]. В цьому випадку матеріал поводить себе як жорстко-пластичний, а вираз (16) для цього випадку має вигляд:

$$t_k = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{\delta}{\xi}. \quad (17)$$

З (16) можна визначити величину пружної деформації поверхні деталі $h_{\text{прп}}$:

$$h_{\text{прп}} = \xi \cdot \sin \left(\omega \cdot t_k - \arccos \frac{\delta}{\xi} \right). \quad (18)$$

Якщо знехтувати пружним відтисненням деталі в процесі обробки, то величина пластичної деформації поверхні деталі становить:

$$h_{\text{пл}} = \xi - \delta - h_{\text{прп}}. \quad (19)$$

Підставивши (18) в (19) і зробивши нескладні перетворення, отримаємо:

$$h_{\text{пл}} = \xi \left[1 - \sin \left(\omega \cdot t_k - \arccos \frac{\delta}{\xi} \right) \right] - \delta. \quad (20)$$

Для жорстко-пластичних матеріалів:

$$h_{\text{пл}} = \xi (1 - \cos \omega \cdot t_k). \quad (21)$$

З урахуванням (20), (21) зміна діаметра циліндричної поверхні:

$$\Delta D = 2 \left[\xi (1 - \sin (\omega \cdot t_k - \arccos \delta / \xi)) - \delta \right]; \quad (22)$$

$$\Delta D = 2 \xi (1 - \cos \omega \cdot t_k). \quad (23)$$

Таким чином, використовуючи вищевикладене можливо контролювати розміри деталі в процесі обробки, контролюючи час контакту інструмента з деталлю. Це дає можливість автоматизувати процес вигладжування з попереднім зазором.

При розрахунку часу контакту інструмента з деталлю було прийняте припущення, що інструмент упроваджується в поверхню деталі на глибину h , яка дорівнює різниці амплітуди коливань ξ і зазору δ . Для перевірки цього припущення використали результати експериментів по вигладжуванню деталей з алюмінієвих сплавів Д16Т (НВ 120), В95 (НВ 180) та загартованої сталі 45 (HRC 50). Деталі із алюмінієвих сплавів вигладжували твердосплавним наконечником із радіусом сфери наконечника 2 мм при глибині впровадження 2, 4 та 6 мкм. При вигладжуванні сталі 45 використовувався інструмент з радіусом робочої частини 1 мм із глибинами впровадження 4, 6 та 8 мкм. В експериментах визначали величину пластичної деформації $h_{\text{пл}}$. По отриманому значенню пластичної деформації за залежністю (24) [7] розраховували нормальну силу вигладжування N :

$$h_{\text{пл}} = \frac{N}{2\pi R C \sigma_s} - \frac{3}{8} I (N \pi C \sigma_s)^{1/2}, \quad (24)$$

де C – стала величина ($C \approx 3$); σ_s – межа текучості матеріалу деталі;

$$I = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2},$$

де μ_1, μ_2 – коефіцієнт Пуассона матеріалу інструмента та деталі відповідно; E_1, E_2 – модуль пружності матеріалу інструменту та деталі відповідно.

По отриманому з (24) значенню N розраховували величину пружної деформації по залежності (25) [7]:

$$h_{\text{прп}} = 0,75 I \sqrt{N \cdot \pi \cdot C \cdot \sigma_s}. \quad (25)$$

Результати експериментів та розрахунків представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Експериментальні та розрахункові значення деформації

Матеріал деталі	Експериментальні та розрахункові параметри	Глибина впровадження, мкм		
		2	4	6
Д16Т, НВ 120	$h_{\text{пл}}$ експериментальне, мкм	2	3	5
	$h_{\text{прп}}$ розрахункове за (25), мкм	4	5	6
	$\Sigma(h_{\text{пл}} + h_{\text{прп}})$, мкм	6	8	11
В95, НВ 180	$h_{\text{пл}}$ експериментальне, мкм	0,5	2	4
	$h_{\text{прп}}$ розрахункове за (25), мкм	5,3	7	9
	$\Sigma(h_{\text{пл}} + h_{\text{прп}})$, мкм	5,8	9	13
Сталь 45, HRC 50	$h_{\text{пл}}$ експериментальне, мкм	0,5	1	2
	$h_{\text{прп}}$ розрахункове за (25), мкм	4,3	5	6
	$\Sigma(h_{\text{пл}} + h_{\text{прп}})$, мкм	4,8	6	8

Як видно з розрахунків та експериментальних даних, сума пружної та пластичної деформації у всіх випадках перевищує глибину впровадження інструмента в поверхню деталі. Отже, припущення, що інструмент упроваджується в деталь на глибину, яка дорівнює різниці амплітуди коливань і попереднього зазору, вірні.

6. Дослідження часу контакту інструмента з деталлю

Для перевірки залежності (16) провели експериментальне дослідження часу контакту інструмента з деталлю за наступною методикою. Для вимірювання часу контакту інструмента з виробом деталей 1 (рис. 6) встановлюється на оправку 2, яка ізолювана від верстата. Верстат і оправка за допомогою струмознімача 3 вмикаються в електричний ланцюг. Він складається з гальванічного елемента або джерела постійного струму 4 і конденсатора 5, а також електронного осцилографа 6 типу С1-57 і частотоміра 7 типу Ф5041. У процесі обробки деталі 1 інструментом 8 електричний ланцюг періодично замикається та розмикається. Це реєструється на екрані осцилографа у вигляді прямокутних імпульсів.

Знаючи тривалість розвертки осцилографа по ширині імпульсу, визначали час контакту. Цей час реєстрували також частотоміром, увімкнутим на режим вимірювання часу. Для виключення дії постійної складової у ланцюг умикається конденсатор 5.

Експериментальні та розрахункові за (16) залежності часу контакту від попереднього зазору при обробці

сталей різної твердості показані на рис. 7. Суцільними лініями показані розрахункові значення, точками – експериментальні.

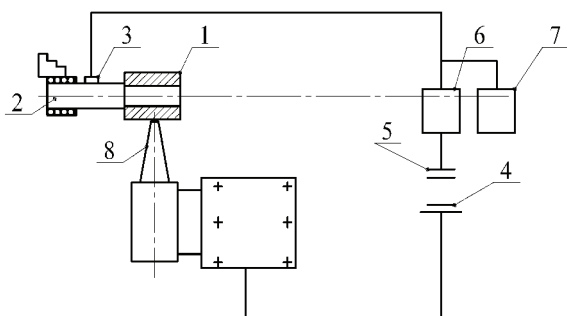


Рис. 6. Схема вимірювання часу контакту інструмента з деталлю:

1 – деталь; 2 – оправка; 3 – струмознімач; 4 – джерело постійного струму; 5 – конденсатор; 6 – осцилограф; 7 – частотомір; 8 – магнітострикційний перетворювач з інструментом

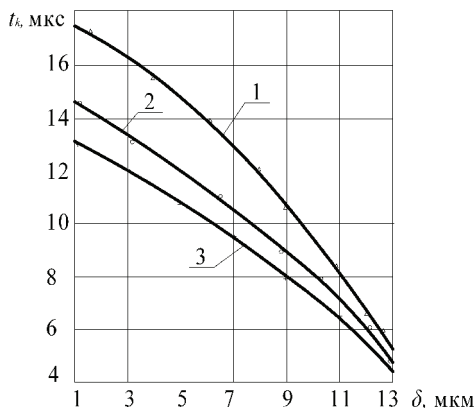


Рис. 7. Залежність часу контакту від зазору; $\xi = 15$ мкм; $R = 2$ мм; $R_o = 1,4$ мкм:
1 – сталь 45, 50 HRC; 2 – сталь 45, 200 HB;
3 – сталь 10, 100 HB

Як видно з рис. 7, із збільшенням твердості матеріалу деталі час контакту збільшується. Це пояснюється тим, що із збільшенням твердості матеріалу деталі пружні деформації збільшуються і, як слідує з (16), збільшується час контакту.

Для всіх досліджених матеріалів із збільшенням радіуса робочої сфери інструменту час контакту також збільшується (рис. 8, 9). Із збільшенням радіуса робочої сфери інструменту збільшується площа контакту інструмента з деталлю, а, отже, зменшуються контактні тиски в зоні деформації. Це приводить до переважання пружних деформацій над пластичними і, як наслідок, до збільшення часу контакту.

Як видно з рис. 7–9, при глибинах впровадження інструменту, які приблизно рівні висоті мікронерівностей, твердість матеріалу деталі та радіус інструменту мало впливають на час контакту. Це пояснюється тим фактом, що згідно з [7, 20] для таких умов деформування переважає пластична деформація й матеріал деталі поводить себе як жорстко-пластичний, а час контакту відповідає залежності (17).

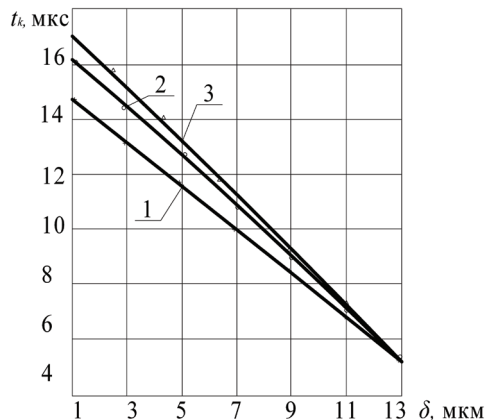


Рис. 8. Залежність часу контакту від зазору; $\xi = 15$ мкм; сталь 45; $R_o = 1,4$ мкм:
1 – $R = 2$ мм; 2 – $R = 4$ мм; 3 – $R = 6$ мм

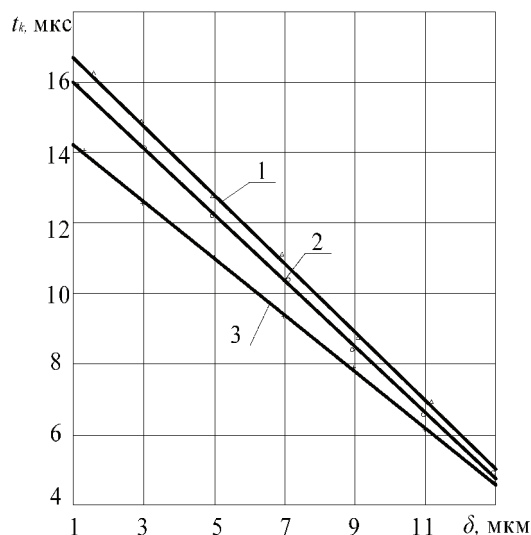


Рис. 9. Залежність часу контакту від зазору; $\xi = 15$ мкм; Д16Т; $R_o = 1,4$ мкм:
1 – $R = 2$ мм; 2 – $R = 4$ мм; 3 – $R = 6$ мм

7. Площа контакту інструмента з деталлю

При ультразвуковому вигладжуванні з попереднім зазором площа контакту інструмента з деталлю змінюється на протязі періоду коливань від нуля до максимального значення при зміні глибини впровадження інструменту від 0 до h . Очевидно, що площа контакту є функцією, яка залежить від радіуса інструмента, глибини впровадження, діаметра деталі, подачі та швидкості обробки.

Контактні тиски на першій стадії впровадження, коли площа контакту інструмента близька до нуля, досягають максимальних значень. При розгляданні площі контакту слід розрізняти перше й повторне прикладання навантаження. Якщо при першому прикладанні навантаження переважає пластична деформація виступів мікронерівностей, то при повторному навантаженні, без зсуву контактуючих поверхонь, деформація буде пружною [7]. Як наслідок цього, площа контакту інструмента з деталлю при повторному навантаженні повинна складатися із двох зон, а саме пружної й пластичної або пружно-пластичної. В подальшому, при розгляданні площі контакту, будемо мати на увазі її максимальне значення.

В роботі [18] показано, що при динамічній взаємодії інструмента з деталлю деформація поверхні деталі здійснюється впровадженням інструмента в поверхню деталі. Для з'ясування як проходить деформація мікронерівностей, удавлюванням чи зсувом, провели наступний експеримент. Відомо [6], що при застосуванні твердих мастил типу дисульфід молібдену або йодистого кадмію в процесах поверхневого пластичного деформування зсувна деформація локалізується в шарі мастила. При цьому, якщо деформація здійснюється зсувом, то шорсткість поверхні після обробки не змінюється. Тому провели вигладжування зразків із сталі 45, твердістю 200 НВ і вихідною шорсткістю поверхні $R_a=4$ мкм. Вигладжування проводили при наступних режимах: $\delta=4$ мкм, $\xi=12$ мкм, $S=0,01$ мм/об, $V=90$ м/хв інструментом виготовленим із твердого сплаву ВК 15 з радіусом робочої сфери $R=2$ мм. В якості мастила використовували йодистий кадмій. До та після обробки виміряли шорсткість поверхні по R_a та зняли профілограму поверхні. Шорсткість обробленої поверхні зменшилась до $R_a=0,25\ldots 0,32$ мкм. На профілограмі вершини мікронерівностей необробленої поверхні загострені. В той же час, вершини мікронерівностей обробленої поверхні плоскі.

Таким чином, можна зробити висновок, що деформація мікронерівностей проходить за рахунок вдавлювання виступів мікронерівностей у западини, так як зсувну деформацію виключили за рахунок застосування твердого мастила. Про те, що зсувна деформація відсутня, говорить і той факт, що на мікросліфах обробленої поверхні не вдалося виявити текстури, хоча зміцнення поверхні спостерігається. Базуючись на цьому висновку, можливо не враховувати позаконтактну хвилю деформації, яка виникає перед інструментом у процесах вигладжування з безперервним контактом [6, 7, 20].

Експериментальне дослідження поверхні контакту проводили нанесенням тонкого шару міді на твердо-сплавний індентор гальванічним способом, або протиранням наконечника тканиною, змоченою у розчині сірчанокислої міді. Після обробки таким наконечником у зоні контакту шар міді витирався, що давало змогу вимірювати площу контакту. Дослідження показали, що поверхня контакту інструмента з деталлю представляє собою фігуру близьку до еліпса, хоча напіввісі еліпса незначно розрізняються між собою по довжині.

Згідно (1), за час контакту, на протязі періоду коливань, робоча сфера інструмента радіусом R впровадиться в поверхню циліндричної деталі радіусом R_1 на глибину h (рис. 10), яка, якщо знехтувати пружним відтисненням деталі $h_{пр}$, становить:

$$h = \xi - \delta. \quad (26)$$

З геометричних міркувань напіввісь еліпса в напрямку обертання деталі:

$$r = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{2hR_1 + h^2}{2(R + R_1 + h)} \right)^2}. \quad (27)$$

Рівняння (27) можливо спростити, не беручи до уваги малі величини вищого порядку:

$$r = \sqrt{\frac{2hRR_1}{R + R_1}}. \quad (28)$$

Значення r , розраховані за рівнянням (28) для різних глибин упровадження при $R_1=30$ мм, представлені в табл. 2.

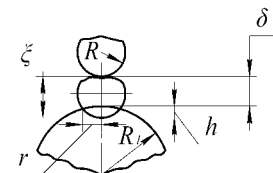


Рис. 10. Схема впровадження інструмента в деталь на протязі періоду коливань у напрямку обертання деталі

Таблиця 2

Значення довжини контакту (мкм) у напрямку обертання деталі

h , мкм	R , мм		
	2	4	6
1	61	84	100
2	87	119	141
3	106	146	173
4	122	168	200
5	137	188	224
6	150	206	245
7	162	222	265
8	173	238	283
9	184	252	300
10	194	260	316

Половина довжини контакту в напрямку подачі:

$$r_1 = \sqrt{h(2R - h)}. \quad (29)$$

Значення r_1 , розраховані за рівнянням (29) наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Значення довжини контакту (мкм) у напрямку подачі

h , мкм	R , мм		
	2	4	6
1	63	89	109
2	89	126	155
3	109	155	189
4	126	179	219
5	141	200	245
6	155	219	268
7	167	237	289
8	179	253	309
9	189	268	328
10	200	283	346

Як видно з табл. 2, 3, розрахункові значення довжин контакту в напрямку обертання і подачі відрізняються не більше ніж на 9 %, що співпадає з експериментальними даними.

За час взаємодії інструмента з деталлю він пройде шлях L у напрямку обертання, який дорівнює:

$$L = \int_{t_1}^{t_2+t_3} V dt. \quad (30)$$

Підставивши значення t_1, t_2, t_3 із (13)–(15), отримаємо:

$$L = \int_{\frac{1}{\omega} \arcsin \frac{\delta}{\zeta}}^{\frac{1}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{h_{\text{прп}}}{\zeta} \right)} V dt = \frac{V}{\omega} \left(\arccos \frac{\delta}{\zeta} + \arcsin \frac{h_{\text{прп}}}{\zeta} \right). \quad (31)$$

Очевидно, що довжина контакту в напрямку обертання з урахуванням швидкості обробки:

$$2a = L + 2r = \frac{V}{\omega} \left(\arccos \frac{\delta}{\zeta} + \arcsin \frac{h_{\text{прп}}}{\zeta} \right) + 2\sqrt{\frac{2hRR_1}{R+R_1}}. \quad (32)$$

За той же час шлях u в напрямку подачі:

$$L_1 = \int_{\frac{1}{\omega} \arcsin \frac{\delta}{\zeta}}^{\frac{1}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{h_{\text{прп}}}{\zeta} \right)} \frac{VS}{\pi D_1} dt = \frac{VS}{\pi D_1 \omega} \left(\arccos \frac{\delta}{\zeta} + \arcsin \frac{h_{\text{прп}}}{\zeta} \right), \quad (33)$$

де S – повздовжня подача; D_1 – діаметр деталі.

З урахуванням (33), довжина контакту в напрямку подачі:

$$2a_1 = L_1 + 2r_1 = \frac{VS}{\pi D_1 \omega} \left(\arccos \frac{\delta}{\zeta} + \arcsin \frac{h_{\text{прп}}}{\zeta} \right) + 2\sqrt{h(2R-h)}. \quad (34)$$

Розраховані за (33), (34) значення a та a_1 представлені в табл. 4.

Таблиця 4

Значення довжин контакту в напрямку обертання a й a_1 (мкм)

h , мкм	V , м/с	$R=2$ мм		$R=4$ мм		$R=6$ мм	
		a	a_1	a	a_1	a	a_1
1	0	61	63	84	89	100	109
	0,1	61	63	84	89	100	109
	0,8	63	63	85	89	101	109
	1,5	64	63	87	89	102	109
	2,2	65	63	88	89	104	109
5	0	137	141	188	200	224	245
	0,1	137	141	188	200	224	245
	0,8	141	141	192	200	228	245
	1,5	144	141	195	200	232	245
	2,2	147	141	199	200	232	245
10	0	194	200	266	283	316	346
	0,1	195	200	267	283	317	346
	0,8	200	200	272	283	323	346
	1,5	205	200	278	283	328	346
	2,2	210	200	283	283	334	346

Як показують розрахунки, довжина контакту в напрямку подачі a_1 не залежить від швидкості обертання й величини подачі. В той же час, довжина контакту в напрямку обертання змінюється із зміною швидкості, однак ця зміна в діапазоні швидкостей від 0 до 2,2 м/с складає не більше 6 %.

За один повний оберт деталі інструмент переміщується відносно осі деталі на величину подачі S . Частина сферичної робочої поверхні інструмента контактує пружно з поверхнею деталі обробленою на попередньому етапі обробки (поверхня обмежена кривою АЕСД, рис. 11), інша частина інструмента контактує пружно-пластично або пластично по поверхні обмеженій кривою АВСЕ. Площі цих поверхонь визначимо, записавши рівняння еліпсів, показаних на рис. 11.

$$y = \frac{a}{a_1} \sqrt{a_1^2 - x^2}; \quad (35)$$

$$y = \frac{a}{a_1} \sqrt{a_1^2 - x^2}. \quad (36)$$

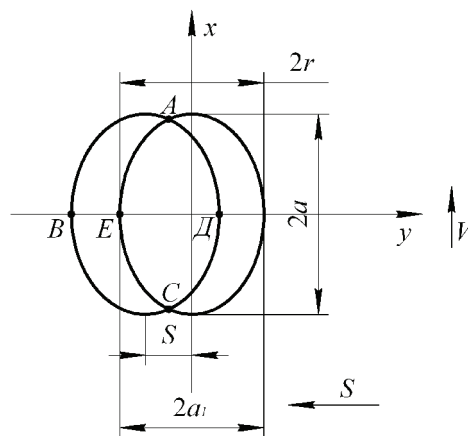


Рис. 11. Схема взаємодії інструмента з деталлю

Координату x , точок A і C перетину еліпсів визначимо, розв'язавши сумісно (35) і (36).

$$x = S/2.$$

Очевидно, що площа пружно-пластичної частини зони контакту визначається наступною залежністю:

$$F = 2 \int_{S/2}^{S+a_1} \frac{a}{a_1} \sqrt{a_1^2 - (x-S)^2} dx - 2 \int_{S/2}^{a_1} \frac{a}{a_1} \sqrt{a_1^2 - x^2} dx = \frac{aS}{2a_1} \sqrt{4a_1^2 - S^2} + 2aa_1 \cdot \arcsin \frac{S}{2a_1}. \quad (37)$$

Повна площа контакту рівна

$$F_n = \pi \cdot a \cdot a_1. \quad (38)$$

Аналіз залежностей (37), (38) (табл. 5) показує, що площа пружно-пластичної зони контакту і повна площа контакту мало залежать від швидкості обробки.

Враховуючи цей факт, а також те, що осі відбитку відрізняються між собою не більше ніж на 8 %, еліпсоподібну

форму відбитка можливо замінити колоподібною радіусом r_1 , який розраховується за формулою (29). В цьому випадку рівняння (37) для пружно-пластичної зони контакту приймає вигляд:

$$F = \frac{S}{2} \sqrt{4r_1^2 - S^2} + 2r_1^2 \arcsin \frac{S}{2r_1}. \quad (39)$$

Повна площа відбитку

$$F_{\Pi} = \pi \cdot r_1^2. \quad (40)$$

Таблиця 5

Значення пружно-пластичної та повної площі контакту

h , мкм	V , м/с	$R=2$ мм		$R=4$ мм		$R=6$ мм	
		F , мм ²	F_{Π} , мм ²	F , мм ²	F_{Π} , мм ²	F , мм ²	F_{Π} , мм ²
1	0	0,011	0,012	0,016	0,0235	0,0193	0,0342
	0,1	0,011	0,012	0,016	0,0235	0,0193	0,0343
	0,8	0,011	0,012	0,016	0,0239	0,0196	0,0347
	1,5	0,011	0,013	0,016	0,0243	0,0198	0,0352
	2,2	0,011	0,013	0,016	0,0247	0,02	0,0356
5	0	0,0268	0,0607	0,0372	0,118	0,0445	0,172
	0,1	0,0269	0,0609	0,0373	0,118	0,0446	0,173
	0,8	0,0276	0,0624	0,0380	0,121	0,0453	0,175
	1,5	0,0282	0,0638	0,0386	0,123	0,0460	0,178
	2,2	0,0289	0,0653	0,0394	0,125	0,0467	0,181
10	0	0,0384	0,122	0,0529	0,236	0,0630	0,343
	0,1	0,0385	0,122	0,0531	0,237	0,0639	0,347
	0,8	0,0395	0,125	0,0541	0,242	0,0643	0,354
	1,5	0,0405	0,128	0,0552	0,247	0,0654	0,360
	2,2	0,0415	0,132	0,0563	0,251	0,0666	0,366

При виведенні залежностей (37), (38) не враховувалось пружне відновлення відбитка виконаного на попередньому етапі деформування, тому нижче розглянемо модель, яка більше відповідає реальним умовам контактування інструмента й деталі. При повному оберті деталі інструмент переміститься відносно осі деталі на величину подачі S , при цьому сферична робоча поверхня інструмента на кінцевому етапі деформування виконає лунку радіусом r_1 (рис. 12).

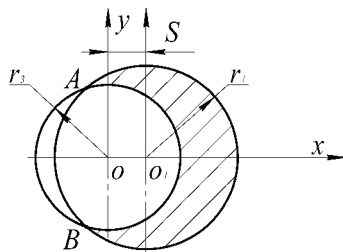


Рис. 12. Схема взаємодії інструмента з деталлю при пружному відновленні відбитка

Частина робочої поверхні інструмента виконує пружно-пластичну деформацію в заштрихованій області, інша

частина робочої поверхні виконує пружну деформацію при взаємодії з сферичним відбитком радіусом r_3 , виконаним на попередньому етапі деформування. Координату x точок A і B перетину кіл обмежуючих відбитки визначимо розв'язавши сумісно рівняння кіл (41), (42).

$$x^2 + y^2 = r_3^2; \quad (41)$$

$$(x - S)^2 + y^2 = r_1^2; \quad (42)$$

$$x = \frac{r_3^2 - r_1^2 + S^2}{2S}. \quad (43)$$

Очевидно, що площа пружно-пластичної зони контакту визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} F &= 2 \int_{\frac{r_3^2 - r_1^2 + S^2}{2S}}^{S+r_1} \sqrt{r_1^2 - (x-S)^2} dx - 2 \int_{\frac{r_3^2 - r_1^2 + S^2}{2S}}^{r_3} \sqrt{r_3^2 - x^2} dx = \\ &= \frac{\pi}{2} (r_1^2 - r_3^2) - \frac{r_3^2 - r_1^2 - S^2}{2S} \sqrt{r_1^2 - \left(\frac{r_3^2 - r_1^2 - S^2}{2S} \right)^2} - \\ &\quad - r_1^2 \arcsin \frac{r_3^2 - r_1^2 - S^2}{2S \cdot r_1} + \\ &\quad + \frac{r_3^2 - r_1^2 + S^2}{2S} \sqrt{r_3^2 - \left(\frac{r_3^2 - r_1^2 + S^2}{2S} \right)^2} + \\ &\quad + r_3^2 \arcsin \frac{r_3^2 - r_1^2 + S^2}{2S \cdot r_3}. \end{aligned} \quad (44)$$

Рівняння (44) справедливо при умові:

$$r_1 + r_3 \geq S \geq r_1 - r_3. \quad (45)$$

Якщо $S \leq r_1 - r_3$ площа пружно-пластичної зони контакту не залежить від подачі і розраховується наступним чином:

$$F = \pi (r_1^2 - r_3^2). \quad (46)$$

В цьому випадку зона контакту інструмента з деталлю повністю перекриває пластичний відбиток виконаний на попередньому циклі деформації і повна площа контакту розраховується за формулою:

$$F_{\Pi} = \pi \cdot r_1^2. \quad (47)$$

Якщо $S \geq r_1 + r_3$ сферична робоча поверхня інструмента не перекриває відбитка виконаного на попередньому циклі деформації. В цьому випадку пружно-пластична і повна площі контакту співпадають і розраховуються за формулою (47). Для визначення r_3 необхідно підставити в (29) замість h значення h_{Π} із (5) або розрахувати із залежності [7]:

$$\rho^2 = \frac{N}{\pi \cdot C \cdot \sigma_s}, \quad (48)$$

де ρ – радіус площадки контакту відновленого відбитка.

Застосування подач $S \leq r_1 - r_3$ не змінює площі пружно-пластичної зони контакту і, як наслідок, не викликає зміни контактних тисків в зоні деформації. Це дозволяє

зробити припущення, що застосування подач у вказаних межах не буде викликати зміни шорсткості обробленої поверхні, а подача $S = r_1 - r_2$ є оптимальною з точки зору продуктивності. Цікаво відзначити, що наведені в [7] значення оптимальних подач при вигладжуванні хромових покривів $S = 0,02-0,15$ мм/об співпадають із значеннями подач $S = r_1 - r_3$, отриманих-розрахунком (табл. 6).

Таблиця 6

Значення $r_1 - r_3$, мм при різних глибинах впровадження

h, мкм	R, мм								
	2			4			6		
	r_1	r_3	$r_1 - r_3$	r_1	r_3	$r_1 - r_3$	r_1	r_3	$r_1 - r_3$
1	0,063	0,026	0,037	0,089	0,030	0,059	0,110	0,035	0,075
2	0,089	0,044	0,045	0,126	0,052	0,074	0,150	0,058	0,092
3	0,109	0,059	0,05	0,155	0,071	0,084	0,190	0,078	0,112
4	0,126	0,074	0,052	0,179	0,087	0,092	0,220	0,097	0,123
5	0,141	0,087	0,053	0,199	0,103	0,096	0,240	0,115	0,125
6	0,155	0,099	0,051	0,219	0,119	0,100	0,270	0,130	0,140
7	0,167	0,111	0,056	0,236	0,133	0,106	0,290	0,150	0,140
8	0,178	0,123	0,055	0,253	0,147	0,109	0,310	0,160	0,150
9	0,189	0,135	0,054	0,268	0,159	0,109	0,330	0,180	0,150
10	0,199	0,146	0,053	0,282	0,174	0,108	0,350	0,190	0,160

Розрахунки проводили для умов обробки сталі 45, 200 HB при вихідній $R_a = 1,2$ мкм поверхні деталі.

Результати експериментальної перевірки залежностей (43) наведені на рис. 13.

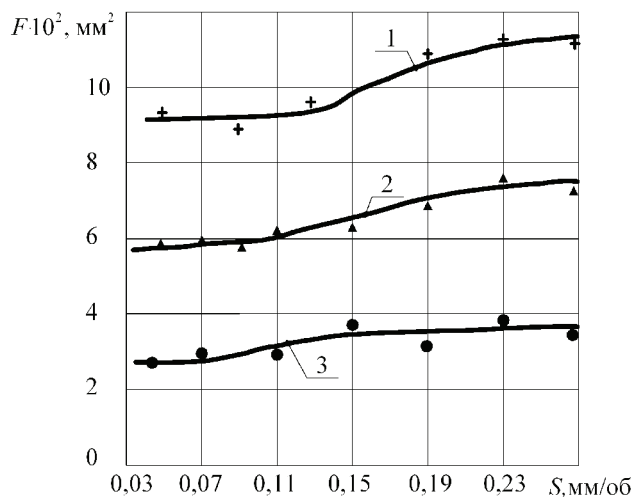


Рис. 13. Залежність площі контакту від подачі при обробці сталі 45:
1 — $R = 6$ мм; 2 — $R = 4$ мм; 3 — $R = 2$ мм

Суцільними лініями показана розрахункова залежність площі контакту від подачі, точками — експериментальні дані. Як видно із рис. 13, експериментальні, та розрахункові дані добре співпадають. Використання подач $S \geq r_1 + r_3$, при яких відбитки виконані на попередній та поточній стадіях деформації не перекриваються дають можливість отримувати поверхні з мікрорельєфом.

8. Обговорення результатів дослідження процесу вигладжування з ультразвуком

В даній роботі досліджено та змодельовано процес поверхневого пластичного деформування з ультразвуком. Розроблений експериментальний стенд, який дозволяє дослідити технологічні параметри процесу вигладжування з попереднім зазором. В результаті проведених експериментальних досліджень було встановлено можливість отримання поверхонь з низькою шорсткістю поверхні. Схема вигладжування з попереднім зазором дозволяє реалізувати режим імпульсного деформування, який забезпечує розрив контакту інструмента і заготовки в процесі обробки, що усуває схоплювання поверхні інструмента та заготовки. Виведено залежність (5) для визначення пластичного деформування при ультразвуковому вигладжуванні з попереднім зазором, що дозволяє визначити розміри деталі після обробки, а також величину пластичної деформації матеріалу HB 100–200. Та виведено залежність (6) для розрахунку розмірів деталі після вигладжування загартованих сталей HRC 50–55. Розроблено залежності (16), (17) для визначення часу контакту інструмента і деталі. Це дає можливість контролювати розмір деталі в процесі обробки, фіксуючи час контакту інструмента з деталлю.

Розроблено схему вимірювання часу контакту інструмента з деталлю. Дослідження цього параметру показало, що час контакту збільшується із збільшенням твердості матеріалу (рис. 7). Із збільшенням радіуса робочої сфери інструменту час контакту також збільшується (рис. 8–9). При глибині входження інструменту, які приблизно рівні висоті мікронерівностей, твердість матеріалу деталі та радіус інструмента мало впливають на час контакту. Це пояснюється тим фактом, що для таких умов деформування переважає пластична деформація, й матеріал деталі поводить себе жорстко-пластично, а час контакту відповідає залежності (17). Виведено залежність (44), яка визначає площу пружно-пластичної зони контакту. Ця залежність дозволяє визначити величини подач, за допомогою яких можна отримати поверхні з низькою шорсткістю або поверхні з мікрорельєфом. Розвиток даного дослідження полягає в вивченні взаємодії інструмента з різним профілем робочої частини, так як в даному дослідженні використовували інструмент із сферичною формою поверхні — радіусом 6, 4 та 2 мм.

9. Висновки

1. Виведенні залежності (5) та (6) для визначення пластичної деформації після вигладжування, показують, що величина пластичної деформації залежить від твердості оброблюваної деталі і радіуса робочої сфери інструмента, а також вихідної шорсткості деталі. Чим більша твердість і радіус інструмента, тим менша величина пластичної деформації.

2. Встановлено, що із збільшенням часу контакту від 6 до 17 мкс пластична деформація зменшується внаслідок переважання пружних деформацій над пластичними.

3. Визначена площа контакту, оптимальна величина подачі і вплив на них параметрів вигладжування, що дозволяє отримувати на поверхні деталі мікрорельєф, або поверхню з низькою шорсткістю. Оптимальна, з точки зору продуктивності, подача становить 0,02–0,15 мм/об.

Література

1. Канарчук В. Є., Посвятенко Е. К., Лопата Л. А. Інженерія поверхні деталей транспортних засобів: сучасний стан і перспективи // Вісник НТУ. 2000. № 4. С. 6–24.
2. Модифікування поверхні деталей машин ультразвуковим методом / Посвятенко Е. К., Посвятенко Е. К., Турич В. В., Шевченко В. І. // Вісник НТУ. 2003. № 8. С. 28–33.
3. Асташев В. К. О влиянии высокочастотных вибраций на процессы пластического деформирования // Машиноведение. 1983. № 2. С. 3–12.
4. Experiments and simulations of ultrasonically assisted turning tool / Rimkeviciene J., Ostasevicius V., Jurenas V., Gaidys R. // Mechanika. 2009. Issue 1. P. 42–46.
5. Moriawaki T. Development of 2DOF Ultrasonic Vibration Cutting Device for Ultraprecision Elliptical Vibration Cutting // Key Engineering Materials. 2010. Vol. 447-448. P. 164–168. doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.447-448.164
6. Демкин Н. Б., Рыжов Э. В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
7. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
8. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 278 с.
9. Ultrasonic physico-chemical methods of processing and assembly / Kalashnikov V. V., Valogin M. F., Nerubai M. C., Shtrykov B. L., Khan F. R. New Delhi, 2002. 161 p.
10. Турич В. В., Руткевич В. С. Контактна взаємодія інструмента з деталлю в процесі деформуючого протягування з ультразвуком // Промислова гідроліка і пневматика. 2016. № 4 (54). С. 71–76.
11. Investigation of the process of thread extrusion using the ultrasound / Turych V., Weselowskaya N., Rutkevych V., Shargorodskiy S. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, Issue 1 (90). P. 60–68. doi: 10.15587/1729-4061.2017.114564
12. Kumar J. Ultrasonic machining – a comprehensive review // Machining Science and Technology. 2013. Vol. 17, Issue 3. P. 325–379. doi: 10.1080/10910344.2013.806093
13. Bernhard K. Ultraschallbehandlung zur Herstellung von Teilen aus spröden Materialien // Ein harter Job. Maschinenmarkt. 2002. Vol. 108, Issue 12. P. 24–25.
14. Manufacture of Overhanging Sharp Corner by Means of 6-Axis Control Machining with the Application of Ultrasonic Vibrations / Japitana F. H., Morishige K., Yasuda S., Takeuchi Y. // JSME International Journal Series C. 2003. Vol. 46, Issue 1. P. 306–313. doi: 10.1299/jsmec.46.306
15. Khan F. R. Finite element analysis (FAE) model of ultrasonic assembly process in Mechanical engineering // International journal of mechanical engineers. 2001. P. 58–66.
16. Турич В. В., Руткевич В. С. Спосіб ультразвукової зміцнюючої обробки: Пат. № 70985 UA. МПК B24B 39/00. № u20120046; заявл. 16.01.2012; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.
17. Турич В. В., Руткевич В. С. Пристрій для вимірювання параметрів ультразвукових коливань: Пат. № 101967 UA. МПК G01H 1/08. № u201503354; заявл. 10.04.2015; опубл. 12.10.2015, Бюл. № 19.
18. Combination of friction drilling and form tapping processes on dissimilar materials for making nutless joints / Urbikain G., Perez J. M., López de Lacalle L. N., Andueza A. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2016. Vol. 22, Issue 6. P. 1007–1020. doi: 10.1177/0954405416661002
19. Клубович В. В., Степаненко А. В. Ультразвуковая обработка материалов. Мн.: Наука и техника, 1981. 295 с.
20. Кумабэ Д. Вибрационное резание. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.